

# Sensibilidad de fibras de cristal fotónico con sus parámetros estructurales: su aplicación en sensores

J. M. Lázaro-Urrutia, D. González, M. Lomer, C. Galíndez, A. Quintela, P.B. García-Allende y J. M. López-Higuera.

jmlu@teisa.unican.es.

Grupo de Ingeniería Fotónica, Dpto. TEISA. Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n – 39005 Santander, España.

**Abstract-** We present the application of photonic crystal fibers (PCF) as sensors. For it will be studied the influence of the structural parameters in the fiber (period and hole diameter) with respect to its sensitivity. The effective index will be calculated for different values of these parameters with respect to the normalized frequency. We will have as a result the optimum values that should be used for this application. Finally in this paper, we will show how to use the results to achieve a sensor based on PCF as well as the measuring external parameters ought to influence over the fibre.

## I. INTRODUCCIÓN

En 1991, Philip Russell propuso un nuevo tipo de fibra que presenta unas características únicas. La fibra conocida como microestructurada o de cristal fotónico (FCF). Típicamente es una fibra de sílice pura que presenta una distribución periódica de agujeros de aire en su sección transversal y que se extiende a lo largo de toda su longitud. La periodicidad transversal es rota por la ausencia de uno de los agujeros o por un agujero de mayor diámetro en el centro de la sección transversal lo que permite el guiado de la luz en el eje de la fibra [1-6].

Este tipo de fibras presentan dos posibilidades de guiado dependiendo del diseño de la estructura periódica [7-8]. El primero consiste en el guiado de la luz por un núcleo sólido debido a la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y cubierta producido por la presencia de los agujeros. Este principio de guiado se denomina de reflexión total interna modificado (MTIR). En este caso la periodicidad no es realmente necesaria debido a que la presencia de los agujeros solo produce una disminución del índice de refracción de la cubierta [9]. La segunda forma de guiado hace uso del bandgap fotónico que se produce en estructuras periódicas [10]. En este caso para ciertas longitudes de onda no existen modos de propagación en la estructura periódica. Es decir, la luz no se propaga a través de la sección transversal de la fibra quedando confinada en su interior.

Las FCF han generado un gran interés en los últimos años debido a que sus características proporcionan un amplio rango de aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones puede ser por ejemplo, en comunicaciones ópticas [1-6], sensores ó de detección [8] y atrapado o guiado de partículas [11].

En el campo de los sensores ópticos, es conveniente que la sensibilidad a un parámetro externo (tensión, temperatura, estiramiento, etc) sea la mayor posible. En este artículo se pretende estudiar como un diseño adecuado de los parámetros de la FCF permite aumentar esta sensibilidad y se establecerá cual es la zona de óptimo funcionamiento.

## II. PRINCIPIOS TEÓRICOS

Este artículo se va a centrar en las FCF guiadas por MTIR. La estructura transversal al eje de la fibra se muestra en la Fig. 1.

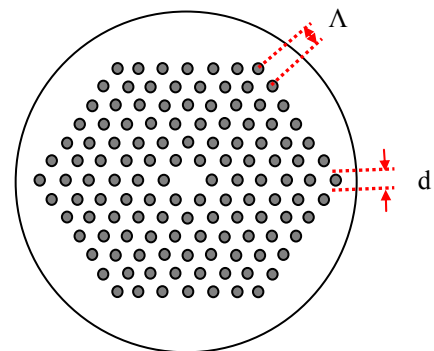


Fig. 1. Corte transversal de la FCF bajo estudio

Esta estructura tiene dos parámetros fundamentales: el periodo ( $\Lambda$ ) que es la separación entre dos agujeros de aire y el parámetro  $d$  que es el diámetro de cada uno de los agujeros. La variación de estos parámetros será estudiada para conseguir la mayor sensibilidad posible.

En las FCF se puede definir la fracción de aire ( $f$ ) como la cantidad de aire que tiene la estructura. Para la estructura de la Fig. 1, la expresión de la fracción de aire es la siguiente:

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{d}{\Lambda} \right)^2 \quad (1)$$

Se observa que  $f$  depende del cociente entre el diámetro de los agujeros y su separación.

A la hora de diseñar una FCF para ser utilizada como sensor es necesario que la variación del cociente  $d/\Lambda$  y por lo

tanto, de la fracción de aire, produzca una máxima variación en la respuesta de la fibra. Para ello se tiene en cuenta que una variación de  $f$  afecta al valor del índice efectivo de los distintos modos de propagación.

Para la realización de este análisis se utiliza el método de expansión de onda plana [7]. Este método fue el primer método teórico para analizar de una forma precisa los cristales fotónicos [12-13] y es probablemente el más aplicado de todos los métodos. En su forma básica, este método es relativamente simple, y usa la periodicidad de la estructura. El método de expansión de onda plana proporciona una rápida herramienta para un análisis en el dominio de la frecuencia.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha comentado anteriormente, se va a analizar la variación del índice efectivo con la variación de la fracción de aire. Para ello se realizó un análisis variando el parámetro  $d/\Lambda$  en el rango de 0.1 a 1 con paso 0.1, que corresponde a fracciones de aire entre el 1% y el 91%.

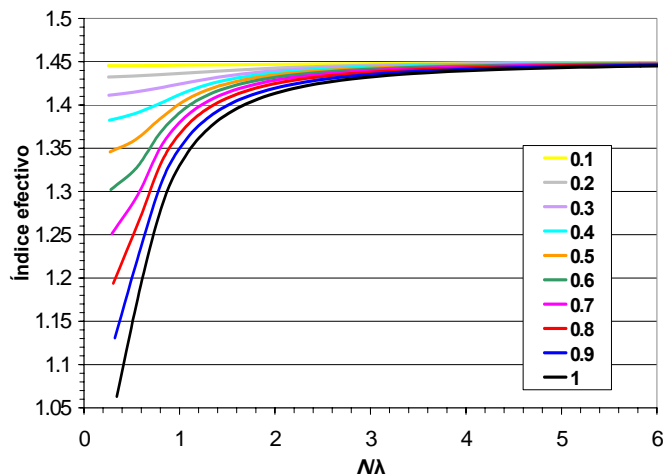


Fig. 2. Cálculo del índice efectivo para el modo fundamental como una función de la frecuencia normalizada,  $\Lambda/\lambda$ , para distintos valores de  $d/\Lambda$ .

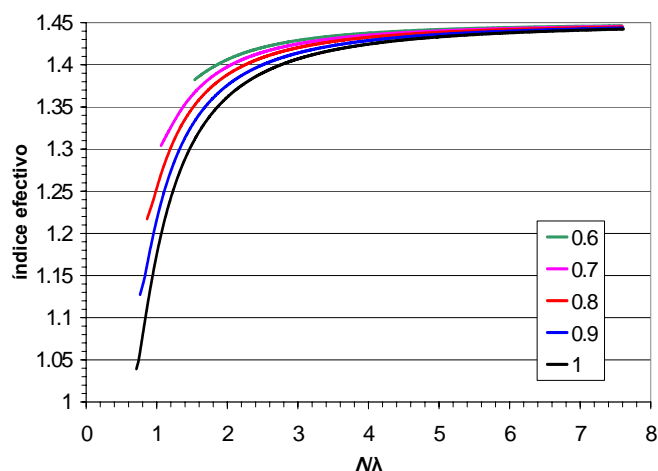


Fig. 3. Cálculo del índice efectivo para el modo de segundo orden como una función de la frecuencia normalizada,  $\Lambda/\lambda$ , para distintos valores de  $d/\Lambda$ .

En la Fig. 2 y en la Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos para el modo fundamental y el modo de segundo orden, respectivamente. En ellas se muestra el índice efectivo en función de la frecuencia normalizada  $\Lambda/\lambda$ . Cabe destacar que para valores bajos de  $d/\Lambda$ , menores de aproximadamente 0.45, la FCF tiene un comportamiento monomodo para un rango ilimitado de la longitud de onda [7], con lo que el modo de segundo orden sólo aparece a partir de este valor. También se observa que este modo de segundo orden aparece a partir de un valor de  $\Lambda/\lambda$  (ver tabla 1), con lo que como se explicará más adelante no interesan las soluciones para valores de  $d/\Lambda$  menores de 0.6.

$d/\Lambda$	$f(\%)$	$\lambda/\Lambda$ inicio
0.5	23	4.48
0.6	33	1.54
0.7	44	1.06
0.8	58	0.86
0.9	73	0.76
1	91	0.71

Tabla 1. Valores de comienzo del modo de segundo orden en función de  $f$

En lo relativo a su aplicación en sensores ópticos se puede ver como hay una zona para valores bajos de  $\Lambda/\lambda$  en la que hay una gran pendiente para valores altos de la fracción de aire. Esta es la zona en la que interesa trabajar ya que se produce una gran variación del índice efectivo con una pequeña variación de  $\Lambda/\lambda$ . Para ver mejor este comportamiento, en la Fig. 4 y en la Fig. 5 se representa el valor de la pendiente de estas curvas para el modo fundamental y el modo de segundo orden, respectivamente. La pendiente se define como la variación del índice efectivo con respecto a la variación de la frecuencia normalizada  $\Lambda/\lambda$ :

$$P = \frac{dn_{eff}}{d(\Lambda/\lambda)} \quad (2)$$

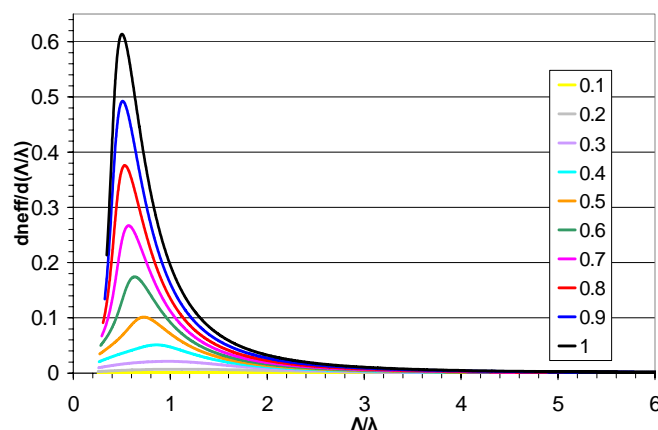


Fig. 4. Pendiente de la curva del índice efectivo para el modo fundamental para distintos valores de  $d/\Lambda$ .

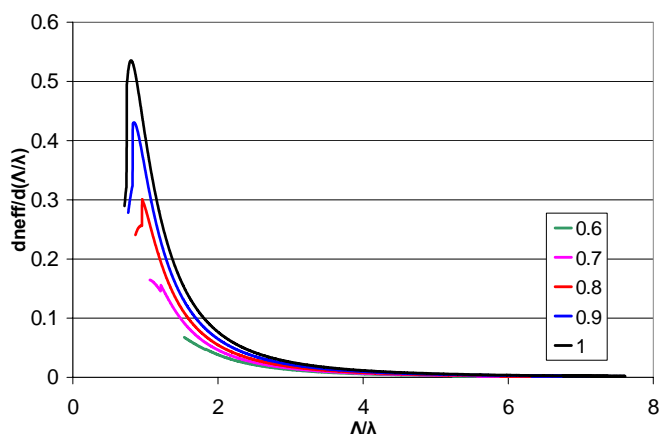


Fig. 5. Pendiente de la curva del índice efectivo para el modo de segundo orden para distintos valores de  $d/\Lambda$ .

En la Fig. 5 se puede observar lo comentado anteriormente de que valores de  $d/\Lambda$  menores de 0.6 producen una variación de índice muy pequeña, por lo que no interesa para esta aplicación.

A partir de la Fig. 4 y la Fig. 5 se pueden obtener los parámetros óptimos para diseñar un sensor con una FCF como la mostrada en la Fig. 1. Lo primero que se observa es que para los dos modos es conveniente trabajar con la mayor fracción de aire posible. Por otro lado, para cada valor de  $d/\Lambda$  existe un valor de  $\Lambda/\lambda$  en el que se obtiene una  $P$  máxima, y por tanto, una máxima sensibilidad. En la tabla 1 se muestran estos valores para los distintos casos de fracción de aire se observa que para los mismos valores de fracción de aire, el modo de segundo orden tiene la zona de funcionamiento óptima para valores de  $\Lambda/\lambda$  mayores que el modo fundamental. Comparando ambas figuras se obtiene también que el modo fundamental tiene una pendiente algo mayor.

$d/\Lambda$	$f(\%)$	modo fundamental	modo 2º orden
		$\Lambda/\lambda$ óptimo	$\Lambda/\lambda$ óptimo
0.1	1	1.75	-
0.2	4	1.08	-
0.3	8	0.98	-
0.4	15	0.86	-
0.5	23	0.73	-
0.6	33	0.63	1.54
0.7	44	0.57	1.06
0.8	58	0.53	0.96
0.9	73	0.51	0.84
1	91	0.5	0.8

Tabla 2. Valores óptimos para las distintas fracciones de aire

Una vez visto como se debe diseñar la fibra para conseguir una gran sensibilidad, solo queda ver como se puede aplicar esto al campo de los sensores ópticos. A la hora de utilizarlo como sensor caben dos posibilidades: variar el periodo de la estructura o variar la longitud de onda.

En el primer caso, el parámetro externo que se desea medir debe producir una variación en el periodo. En este caso la longitud de onda de trabajo se dejará constante. Según los datos que se ha obtenido si se trabaja entorno a la zona óptima una pequeña variación de  $\Lambda$  puede producir una gran variación en el índice efectivo. De este modo parámetros como tensión, estiramiento o temperatura pueden ser medidos con bastante precisión si se consigue que disminuyan el diámetro de la fibra aunque la variación sea pequeña. Cabe destacar que es necesario disminuir todo el diámetro de la fibra ya que esto produce la disminución de  $\Lambda$  que se desea, produciendo al tiempo una disminución del tamaño de los agujeros. Esto último hace que la fracción de aire permanezca prácticamente constante y nos desplazemos a lo largo de la misma curva. Para conseguir esta variación en el diámetro de la fibra se podría aplicar la presión o el estiramiento directamente a la FCF y en el caso de la temperatura esta puede producir una dilatación de la FCF o recubrir la fibra por un polímetro que varíe su volumen con este parámetro de forma que cambie la estructura. Hay que tener en cuenta que si se trabaja con una alta fracción de aire como estamos forzando la estructura de la fibra es más fácil que esta sufra algún daño. Por este motivo hay que llegar a una relación de compromiso entre la sensibilidad que se desee y la fracción de aire de la FCF de modo que no se dañe y se pueda utilizar en el caso de sensado en el que nos encontremos.

La otra posibilidad que se plantea es la variación de la longitud de onda de trabajo manteniendo el periodo constante. En este caso es más difícil conseguir que un parámetro externo modifique la longitud de onda, pero se puede usar como interrogador. En este caso se utilizaría otro dispositivo que sea el que cambie con la longitud de onda, como por ejemplo una red de difracción diseñada para tal efecto, y la FCF se utilizaría solo como detector de la variación producida. Si se utiliza de esta forma no encontramos ninguna limitación en lo referente a la fracción de aire ya que en este caso la FCF no es sometida a ninguna variación.

Para finalizar decir que la variación en el índice efectivo se puede determinar a través de varias técnicas. Es posible incluso medir variaciones de índice tan pequeñas como  $10^{-3}$ . Aunque esto ya es otro tema del que no se va a entrar en detalles en este artículo.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la posibilidad de usar la FCF como sensor con una alta sensibilidad. Para ello se ha calculado el valor de la fracción de aire que mejor resultado ofrece. También se ha obtenido cual es el valor de  $\Lambda/\lambda$  óptimo para tener una mayor sensibilidad, obteniéndose estos para valores bajos de  $\Lambda/\lambda$  que es donde esta la mayor pendiente. En valores altos apenas hay variación del índice efectivo. Por último se ha mostrado dos formas en las que se puede aplicar. Por una parte manteniendo la longitud de onda de trabajo constante y variando el periodo y por otra manteniendo el periodo constante y variando la longitud de onda de trabajo. En ambos casos la aplicación de las FCF

con los parámetros adecuados puede ser de gran interés práctico.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido en parte realizado con los medios aportados por el proyecto TEC2004-05936-C02-02.

#### REFERENCIAS

- [1] P.V. Kaiser and H.W. Astle, "Low-loss single-material fibers made from pure fused silica", *The Bell System Technical Journal*, Vol- 53, (1974) 1021-1039
- [2] J. Broeng, D. Mogilevstev, S.E. Barkou, and A. Bjarklev, "Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides," *Optical Fiber Technology*, Vol- 5, (1999) 305-330.
- [3] J.C. Knight, T.A. Birks, P.S.J. Russell, and D.M. Atkin, "All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, Vol. 21, (1996) 1547-1549.
- [4] J.C. Knight, T.A. Birks, R.F. Cregan, P.S.J. Russell, and J.P. Sandro, "Photonic crystals as optical fibers physics and applications," *Optical Materials*, Vol- 11, (1999) 143-151.
- [5] R.S. Windeler, J.L. Wagener, and D.J. DiGiovanni, "Silica-air microstructured fibers: Properties and applications," *Optical Fiber Communications conference*, San Diego (1999).
- [6] T.A. Birks, J.C. Knight, and P.S.J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, Vol- 22, (1997) 961-963.
- [7] A. Bjarklev, J. Broeng and A. S. Bjarklev, "Photonic Crystal Fibres", Kluwer Academic Publishers (2003)
- [8] John M Fini, "Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids", *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004) 1120–1128
- [9] T.M. Monro, P.J. Bennett, N.G.R. Broderick and D.J. Richardson, "Holey fibers with random cladding distributions" *Opt. Lett.*, Vol- 25, (2000) 206–8.
- [10] J.C. Knight, J. Broeng, T.A. Birks and P. St. J. Russell, "Photonic band gap guidance in optical fibers" *Science*, Vol-282, (1998) 1476–8
- [11] M.J. Renn, R. Pastel, and H.J. Lewandowski, "Laser Guidance and Trapping of Mesoscale Particles in Hollow-Core Optical Fibers", *Physical Review Letters*, Vol- 82, nº 7, (1999) 1574-7
- [12] K. Leung, and Y. Liu, "Full vector wave calculation of photonic band structures in face-centered-cubic dielectric media", *Physical Review Letters*, Vol. 65, (1990) pp. 2646-9
- [13] Z. Zhang, and S. Satpathy, "Electromagnetic wave propagation in periodic structures: Bloch wave solution of Maxwell's equations" *Physical Review Letters*, Vol. 65, (1990) pp. 2650-3